

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе

**«Измерение толщины и удельной электрической проводимости
немагнитных проводящих изделий накладными датчиками
с магнитопроводом»**

**по курсу «Электромагнитные виды неразрушающего контроля»
для студентов специальности**

152 «Метрология и информационно-измерительная техника»

Харьков 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе

**«Измерение толщины и удельной электрической проводимости
немагнитных проводящих изделий накладными датчиками
с магнитопроводом»**

по курсу «Электромагнитные виды неразрушающего контроля»

для студентов специальности

152 «Метрология и информационно-измерительная техника»

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 1 от 03.02.16

Харьков
НТУ «ХПИ»
2016

Методические указания к лабораторной работе «Измерение толщины и удельной электрической проводимости немагнитных проводящих изделий накладными датчиками с магнитопроводом» по курсу «Электромагнитные виды неразрушающего контроля» для студентов специальности 152 «Метрология и информационно-измерительная техника» / Сост. Авраменко А. А., Горкунов Б.М., Сиренко Н.Н., Львов С.Г. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – 18 с. – На русск. яз.

Составители: А. А. Авраменко,
Б.М. Горкунов ,
Н.Н. Сиренко,
С.Г. Львов

Рецензент П.Ф. Щапов

Кафедра «Приборы и методы неразрушающего контроля»

ВСТУПЛЕНИЕ

Среди многообразия накладных преобразователей выделяются датчики с ферромагнитным сердечником, имеющие воздушный зазор. При помещении такого датчика на исследуемое изделие последнее, перекрывая зазор, замыкает магнитный поток магнитопровода. Изменение магнитного потока в зазоре несет информацию о физических свойствах, толщине, химическом составе изделия. Основное преимущество указанных преобразователей состоит в высокой чувствительности, поскольку сконцентрированный в зазоре магнитный поток может достигать значительных величин по сравнению с потоками других накладных датчиков при тех же значениях возбуждающих ампер-витков. Кроме того, в преобразователях с магнитопроводом накладного типа для достижения высокой чувствительности ограничения на габариты возбуждающей обмотки являются менее жесткими по сравнению с требованиями к размерам преобразователей без сердечников. Это связано с тем, что в первых преобразователях каждый из намагничивающих ампер-витков, независимо от места расположения, дает практически равноценный вклад в возбуждающий магнитный поток в зазоре магнитопровода, в то время как в преобразователях без магнитопровода наиболее эффективны ампер-витки, расположенные вблизи изделия. Ампер-витки, удаленные по высоте катушки от изделия, в силу влияния эффектов рассеяния магнитного потока, оказывают слабое воздействие на величину зондирующего магнитного потока.

Расчет накладных датчиков без магнитопровода для измерений характеристик изделий различных конфигураций был проведен в ряде работ

[1–7]. Однако использование результатов этих расчетов для практических целей затруднено, поскольку выходные сигналы таких преобразователей несут многопараметровую информацию не только об измеряемых характеристиках изделий, но и о мешающих факторах, среди которых основным является воздушный зазор между датчиком и изделием. С этой точки зрения, на величину выходных сигналов таких преобразователей оказывает существенное влияние изменение взаимного расположения датчика и изделия, которое в значительной степени затрудняет непрерывный контроль. Расчет первичного индуктивного преобразователя с магнитопроводом, в общем случае, провести сложно ввиду трудности определения различных потоков внутри магнитопровода и вне его (потоков рассеяния). Вычисления еще в большей степени усложняются при учете нелинейного характера намагничивания материала магнитопровода. Хотя и существуют определенные расчетные модели [8, 9] таких датчиков, учитывающие в какой-то мере указанные факторы, но, конечные соотношения этих работ настолько громоздки, что все еще далеки от практического применения в реальных условиях производства.

Следует отметить, что существующие преобразователи с магнитопроводом применимы для контроля изделий только одного типоразмера. Оказывается, при соблюдении определенных требований к конструктивным и схемным решениям можно существенно упростить теоретические выкладки, описывающие работу такого типа преобразователей. Это тем более важно, что результаты такого теоретического обоснования можно применить к универсальному датчику, используемому в силу конструктивных возможностей для исследований изделий различных конфигураций.

1. Работа преобразователя при измерении толщины изделия

Рассмотрим индуктивный преобразователь с разомкнутым магнитопроводом для измерения толщин немагнитных листовых и трубчатых изделий. Чувствительность одного датчика к измеряемому параметру оказывается низкой. Для ее увеличения два одинаковых датчика включены по дифференциальной схеме (рис. 1).

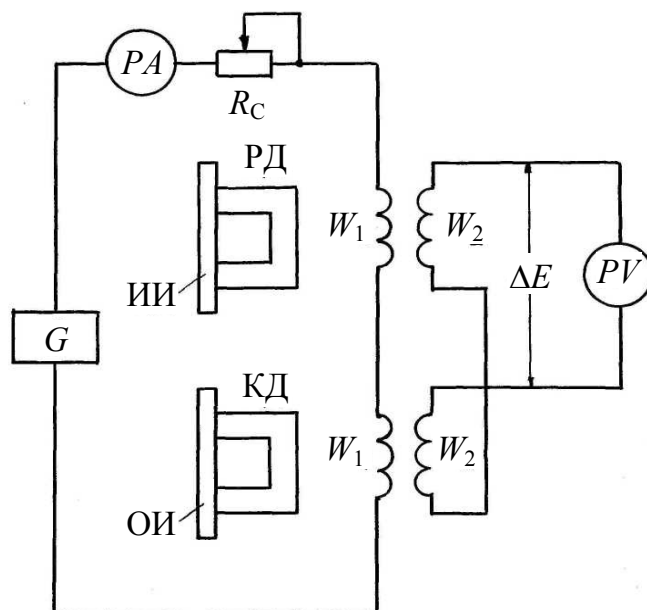


Рисунок 1 – Электрическая схема включения преобразователей

Рабочий РД и компенсационный КД датчики имеют по две идентичные намагничивающие и измерительные обмотки, размещенные на магнитопроводах с зазорами. Рабочий датчик устанавливается на испытуемое изделие ИИ, а компенсационный – на образцовое ОИ. Намагничивающие обмотки с числами витков W_1 включаются последовательно-согласно и питаются от генератора G . Величина тока в намагничивающей цепи регулируется сопротивлением R_c и измеряется амперметром PA . Измерительные обмотки с количеством витков W_2 включаются последовательно-встречно, разностный сигнал ЭДС ΔE измеряется вольтметром PV . Знак приращения толщины изделия определяется при помощи фазочувствительного вольтметра.

На рис. 2 а, б показано размещение магнитопроводов рабочего и компенсационного датчиков на листовом и трубчатом изделиях. Даны обозначения: $\Phi_{a \mp \Delta a}$, $\Phi_{a1 \pm \Delta a}$ и Φ_{p1} – мгновенные значения потоков в исследуемом изделии, в слое воздуха за изделием и рассеяния; Φ_a , Φ_{a1} и Φ_{p2} , – мгновенные значения потоков в образцовом изделии, в слое воздуха за ним и рассеяния; a и a_1 – толщины изделия и слоя воздуха за ним, ограничивающие соответствующие потоки; Δa – изменение толщины изделия; знаки \mp соответствуют уменьшению и увеличению толщины изделия; b – тол-

щина магнитопровода; c – расстояние между полюсами магнитопровода; d – ширина полюса магнитопровода.

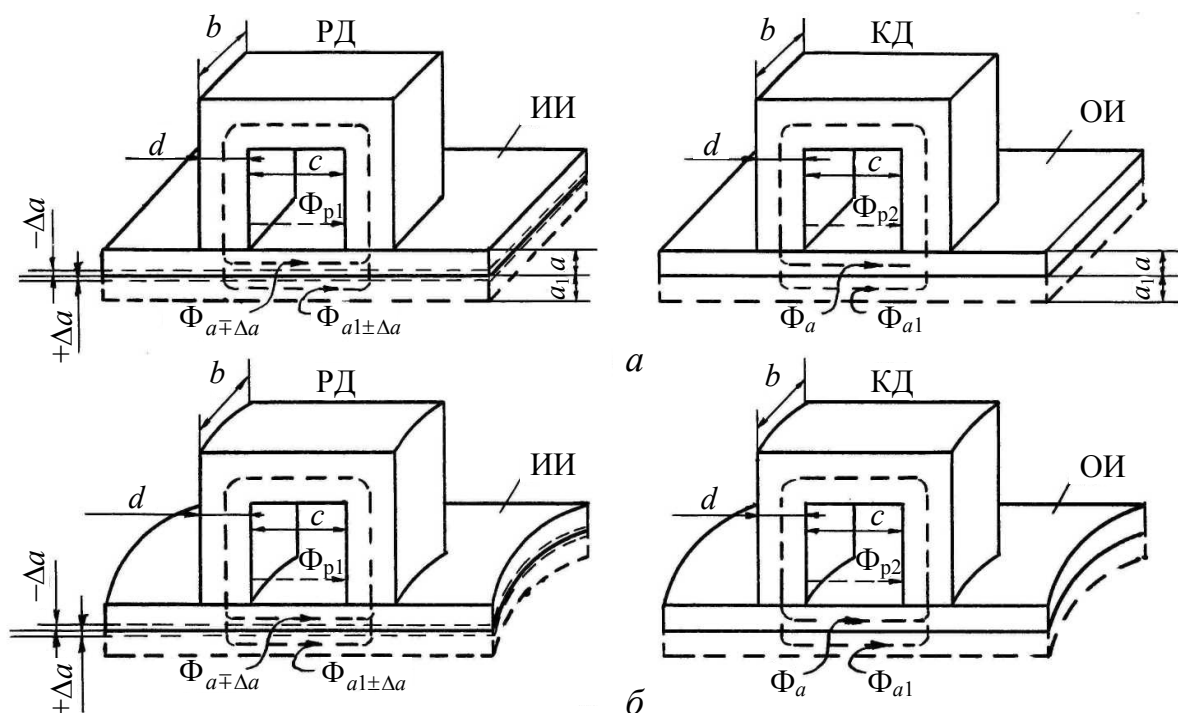


Рисунок 2 – Размещение магнитопроводов рабочего и компенсационного датчиков на листовом (а) и трубчатом (б) изделиях

Назовем $\Phi_{a \mp \Delta a} + \Phi_{a1 \pm \Delta a}$ эффективным потоком рабочего датчика, а $\Phi_a + \Phi_{a1}$ – эффективным потоком образцового датчика. Примем некоторые допущения. Поскольку воздушный зазор в магнитопроводе сравнительно велик, эффективный магнитный поток будет определяться магнитным сопротивлением зазора, а не сопротивлением магнитопровода. Кроме эффективного потока, существуют потоки рассеяния, расчет которых можно провести, используя работу [9]. Будем считать, что практически весь эффективный поток ограничивается размером ширины полюса магнитопровода $d = a + a_1$. Последнее подтверждается теоретическими и экспериментальными данными [7, 9, 10].

Выражение для мгновенного значения разностной ЭДС во вторичных обмотках датчиков имеет вид [14]

$$\Delta e = -W_2 \frac{d(\Phi_{a\mp\Delta a} + \Phi_{a1\pm\Delta a} + \Phi_{p1} - \Phi_a - \Phi_{a1} - \Phi_{p2})}{dt}. \quad (1)$$

Так как рабочий и компенсационный датчики выполнены идентичными и включаются по дифференциальной схеме, можно считать, что потоки рассеяния будут одинаковыми (то есть $\Phi_{p1} = \Phi_{p2}$) и в выражении (1) взаимно компенсируются. Это относится к немагнитному изделию, поскольку магнитные потоки, связанные с вихревыми токами, значительно меньше потоков рассеяния.

В основу расчета эффективных потоков датчиков положены законы распространения электромагнитного поля в случае падающей плоской электромагнитной волны [11]. Воспользовавшись выражением для напряженности магнитного поля в теле эталонного и исследуемого изделий и за ними, с учетом изменения толщины последнего, определим соответствующие магнитные потоки. При этом выражения для них имеют вид

$$\Phi_{a\mp\Delta a} = \frac{1}{\sqrt{2}} H_0 \mu_0 \mu_r \delta b \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) - e^{-\frac{a\mp\Delta a}{\delta}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4} - \frac{a\mp\Delta a}{\delta}\right) \right], \quad (2)$$

$$\Phi_{a1\pm\Delta a} = (a_1 \pm \Delta a) H_0 \mu_0 \mu_r b e^{-\frac{a\mp\Delta a}{\delta}} \sin\left(\omega t - \frac{a\mp\Delta a}{\delta}\right), \quad (3)$$

$$\Phi_a = \frac{1}{\sqrt{2}} H_0 \mu_0 \mu_r \delta b \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) - e^{-\frac{a}{\delta}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4} - \frac{a}{\delta}\right) \right], \quad (4)$$

$$\Phi_{a1} = a_1 H_0 \mu_0 \mu_r b e^{-\frac{a}{\delta}} \sin\left(\omega t - \frac{a}{\delta}\right), \quad (5)$$

где H_0 – средняя напряженность магнитного поля в воздушном зазоре датчика; μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); μ_r – относительная магнитная проницаемость изделия; ω – циклическая частота; $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu_r \sigma \omega}}$ –

глубина проникновения магнитного поля в среду; σ – удельная электрическая проводимость материала изделия.

Данные соотношения получены при условии равенства относительных магнитных проницаемостей ($\mu_r = 1$) и удельных электропроводностей материалов исследуемого и образцового изделий. Это можно выполнить на практике с помощью подбора образцовых изделий по значению σ , соответствующей удельной электрической проводимости исследуемого изделия. Если размеры изделия достаточно велики, то оба датчика можно разместить на нем, но при этом должна быть известна толщина изделия в месте размещения образцового датчика.

Воспользовавшись результатами работ [9, 10], можно получить выражение для значения средней напряженности магнитного поля в воздушном зазоре датчика [12, 13]:

$$H_0 = I_n W_1 \frac{b \left[0,26 + \frac{1}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2d}{c} \right) \right] + 2(0,077c + 0,25d)}{bd}, \quad (6)$$

где I_n – величина тока в намагничивающей цепи.

Подставив значения магнитных потоков (2–5) в выражение (1), получим формулу для мгновенного значения разностной ЭДС:

$$\Delta e = \omega W_2 H_0 \mu_0 \mu_r b e^{-\frac{a}{\delta}} \sqrt{M^2 + Q^2} \sin \left(\omega t + \arctg \frac{Q}{M} \right), \quad (7)$$

где

$$M = e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \left(a_1 \pm \Delta a - \frac{\delta}{2} \right) \left(\cos \frac{a}{\delta} \cos \frac{\Delta a}{\delta} \pm \sin \frac{a}{\delta} \sin \frac{\Delta a}{\delta} \right) + \\ + \cos \frac{a}{\delta} \cdot \left(\frac{\delta}{2} \mp \frac{\delta}{2} e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \sin \frac{\Delta a}{\delta} - a_1 \right) + \frac{\delta}{2} \sin \frac{a}{\delta} \left(e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \cos \frac{\Delta a}{\delta} - 1 \right); \quad (8)$$

$$Q = e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \left(\frac{\delta}{2} - a_1 \mp \Delta a \right) \left(\sin \frac{a}{\delta} \cos \frac{\Delta a}{\delta} \mp \cos \frac{a}{\delta} \sin \frac{\Delta a}{\delta} \right) -$$

$$-\sin \frac{a}{\delta} \left(\frac{\delta}{2} \mp \frac{\delta}{2} e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \sin \frac{\Delta a}{\delta} - a_1 \right) + \frac{\delta}{2} \cos \frac{a}{\delta} \left(e^{\pm \frac{\Delta a}{\delta}} \cos \frac{\Delta a}{\delta} - 1 \right). \quad (9)$$

Выражения (7–9) значительно упрощаются при условии $\Delta a / \delta \ll 1$, что соответствует небольшим изменениям толщины исследуемого изделия относительно образцового или малым частотам питающего тока. В этом случае формула для эффективного значения разностной ЭДС имеет вид [12]

$$\Delta E = \omega W_2 H_0 \mu_0 \mu_r b \Delta a e^{-\frac{a}{\delta}} \rho. \quad (10)$$

Величина ρ рассчитывается из следующих соотношений:

- при уменьшении толщины исследуемого изделия относительно образцового:

$$\rho = \frac{a_1}{\delta} \sqrt{\left(1 + \frac{\Delta a}{a_1}\right)^2 + \left(1 + \frac{\Delta a}{a_1} + \frac{\Delta a}{\delta}\right)^2}; \quad (11)$$

- при ее увеличении

$$\rho = \frac{a_1}{\delta} \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{a_1} - 1\right)^2 + \left(1 - \frac{\Delta a}{a_1} - \frac{\Delta a}{\delta}\right)^2}. \quad (12)$$

2. Работа устройства для измерения удельной электрической проводимости

Аналогичный подход можно использовать при разработке дифференциального измерителя удельной электрической проводимости, основанного на применении трансформаторных накладных датчиков с магнитопроводом. При этом в указанных выше пределах применимости его можно использовать для измерения и контроля как плоских, так и цилиндрических изделий.

Теоретическое описание работы и окончательные соотношения рассматриваемого устройства существенно упрощаются при $d < a$.

Поскольку, как правило, представляет интерес определение абсолютного значения величины σ изделия, то в данном случае, используя дифференциальный метод, необходимо расположить рабочий и компенсационный датчики, как показано на рис. 3. При этом рабочий датчик расположен на изделии, а компенсационный имеет воздушный зазор. Магнитный поток в этом зазоре обозначен Φ_b . Предполагается, что он ограничен размером полюса магнитопровода d . Тогда

$$\Phi_b = H_0 \mu_0 b d \sin \omega t. \quad (13)$$

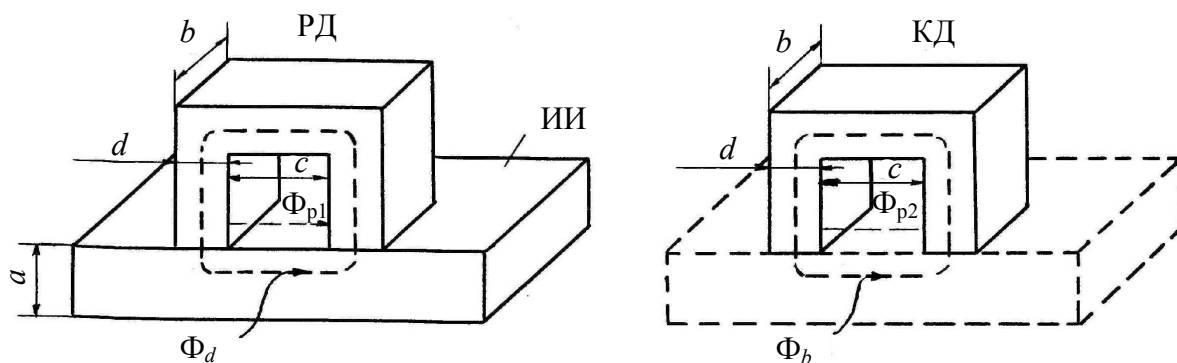


Рисунок 3 – Расположение преобразователей при измерении удельной электрической проводимости изделия

При указанном выше условии магнитный поток в изделии можно записать как

$$\Phi_d = \frac{1}{\sqrt{2}} H_0 \mu_0 \mu_r \delta b \left[\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{4} \right) - e^{-\frac{d}{\delta}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{4} - \frac{d}{\delta} \right) \right]. \quad (14)$$

Для определения разностного магнитного потока воспользуемся формулами (13) и (14). После преобразований выражение для мгновенного значения разностного магнитного потока можно записать в виде

$$\Delta\Phi = H_0\mu_0\mu_r b e^{j\omega t} \begin{bmatrix} \mu_r \delta \left(1 - e^{-\frac{d}{\delta}} \cos \frac{d}{\delta} + e^{-\frac{d}{\delta}} \sin \frac{d}{\delta} \right) - a - \\ - j\mu_r \delta \left(1 - e^{-\frac{d}{\delta}} \cos \frac{d}{\delta} - e^{-\frac{d}{\delta}} \sin \frac{d}{\delta} \right) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

В случае низких частот (т.е. $d/\delta < 1$) последнее выражение существенно упрощается, при этом комплексную величину $\Delta\dot{\Phi}$ для $\mu_r = 1$ (немагнитное изделие) запишем как

$$\Delta\dot{\Phi} = -H_0\mu_0 b e^{j\omega t} \left(\frac{d^2}{\delta} + j \frac{d^2}{\delta} \right), \quad (16)$$

тогда модуль разностной ЭДС, вызванной этим потоком, определим из соотношения

$$\Delta E_\sigma = \sqrt{2} \omega W_2 H_0 \mu_0 b \frac{d^2}{\delta}. \quad (17)$$

Из формулы (17) следует выражение для определения удельной электрической проводимости по измеренному значению разностной ЭДС, которое имеет вид

$$\sigma = \frac{\Delta E_\sigma^2}{\omega^3 W_2^2 \mu_0^3 b^2 H_0^2 d^4}. \quad (18)$$

Из соотношения (18) видно, что зависимость $\sigma = f(\Delta E_\sigma)$ имеет параболический характер.

3. Измерение приращений толщин немагнитных изделий

Для измерения приращений толщин изделий применяются датчики с параметрами: $W_1 = 810$; $W_2 = 4000$; $d = 14 \cdot 10^{-3}$ м; $c = 14 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 19,8 \cdot 10^{-3}$ м. Измерения проводятся при величине намагничивающего

тока, заданного преподавателем. В качестве образцов применяются трубчатые изделия из сплава Д16 с величиной удельной электрической проводимости $1,72 \cdot 10^7$ См/м. Трубчатые изделия имеют наружный диаметр $D = 0,146$ м. При уменьшении толщины исследуемого изделия относительно образцового толщина изделия a равна $8 \cdot 10^{-3}$ м и изменяется на величины Δa , равные 10^{-3} м; $2 \cdot 10^{-3}$ м; $3 \cdot 10^{-3}$ м. При увеличении толщины изделия относительно образцового Δa изменяется на те же величины, а исходная толщина изделия $a = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

Порядок выполнения опыта

Собрать схему, приведенную на рис. 1.

Расчетные значения разностной ЭДС для величины намагничивающего тока $I_n = 0,1$ А в случае уменьшения толщины исследуемого изделия относительно образцового $\Delta E_{p.ym}$ и в случае увеличения толщины исследуемого изделия относительно образцового $\Delta E_{p.yv}$, полученные по формулам (10–11) для различных значений приращений Δa , приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные значения разностной ЭДС $\Delta E_{p.ym}$ и $\Delta E_{p.yv}$

$\Delta a, \text{м}$	$\Delta E_{p.ym}, \text{В}$	$\Delta E_{p.yv}, \text{В}$	$\Delta a, \text{м}$	$\Delta E_{p.ym}, \text{В}$	$\Delta E_{p.yv}, \text{В}$
0,0005	0,0330301	0,049979883	0,0021	0,17846316	0,159838188
0,0006	0,04034438	0,059074808	0,0022	0,18956752	0,164208014
0,0007	0,047895	0,067870214	0,0023	0,2009092	0,168289425
0,0008	0,05568205	0,076366501	0,0024	0,21248823	0,172083642
0,0009	0,06370564	0,084564096	0,0025	0,22430465	0,175591985
0,001	0,07196583	0,092463453	0,0026	0,23635849	0,178815888
0,0011	0,08046271	0,100065057	0,0027	0,24864978	0,181756908
0,0012	0,08919635	0,107369423	0,0028	0,26117855	0,184416736
0,0013	0,09816681	0,114377102	0,0029	0,27394482	0,186797219
0,0014	0,10737416	0,121088685	0,003	0,28694862	0,188900367
0,0015	0,11681847	0,127504801	0,0031	0,30018998	0,190728381
0,0016	0,12649978	0,133626125	0,0032	0,31366893	0,192283667
0,0017	0,13641814	0,139453382	0,0033	0,32738547	0,193568867
0,0018	0,14657362	0,14498735	0,0034	0,34133963	0,194586881
0,0019	0,15696626	0,150228862	0,0035	0,35553144	0,195340899
0,002	0,16759609	0,155178819			

Графические зависимости ЭДС $\Delta E_{p.ум}$ и $\Delta E_{p.ув}$ от изменения толщины изделия Δa приведены на рис. 4.

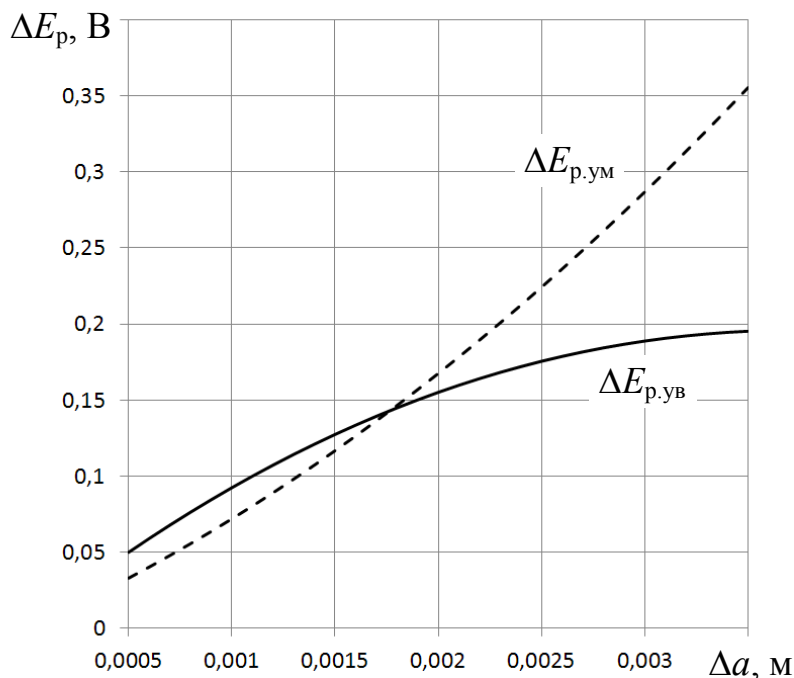


Рисунок 4 – Графические зависимости ΔE_p от Δa

Провести измерения величин ЭДС $\Delta E_{э.ум}$ и $\Delta E_{э.ув}$ для случаев уменьшения и увеличения толщины изделия соответственно для указанных значений изменений толщин Δa .

Результаты измеренных значений ЭДС занести в табл. 2.

По измеренным значениям ЭДС по табл. 1 найти соответствующие им значения изменения толщины изделия Δa для случая уменьшения и увеличения толщины изделия (провести линейную интерполяцию по ближайшим значениям). Полученные значения Δa_3 занести в табл. 2.

Рассчитать относительную погрешность определения Δa , результат расчета занести в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты рассчитанных и измеренных значений ЭДС

Δa , м	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$\Delta E_{\text{э.ум}}$, В			
$\Delta a_{\text{э.ум}}$, м			
$\Delta E_{\text{э.ув}}$, В			
$\Delta a_{\text{э.ув}}$, м			
$\gamma_{\Delta a \text{ ум}}$			
$\gamma_{\Delta a \text{ ув}}$			

4. Измерение удельной электрической проводимости немагнитных изделий

Величина удельной электрической проводимости измеряется датчиками с параметрами: $W_1 = 740$; $W_2 = 3600$; $d = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м; $c = 12,0 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 20,0 \cdot 10^{-3}$ м. Измерения проводить на частоте 50 Гц при значении тока в намагничивающей цепи $I_n = 0,1$ А, при этом напряженность возбуждающего магнитного поля составляет 8917 А/м.

Порядок выполнения опыта

Собрать схему, приведенную на рис. 1. При этом компенсационный датчик не устанавливается на образец, а служит для компенсации потоков рассеяния. Провести измерения ЭДС ΔE_{σ} на образцах из различных материалов. По измеренным значениям разностной ЭДС, пользуясь табл. 3, определить величину σ материала.

Таблица 3 – Величины ЭДС ΔE_{σ} для различных значений σ

σ , См/м	ΔE_{σ} , В	σ , См/м	ΔE_{σ} , В	σ , См/м	ΔE_{σ} , В
1,00E+06	0,18130708	1,00E+07	0,573343	4,00E+07	1,146687
1,05E+06	0,18578447	1,05E+07	0,587502	4,10E+07	1,160932
1,10E+06	0,19015647	1,10E+07	0,601328	4,20E+07	1,175004
1,15E+06	0,19443018	1,15E+07	0,614842	4,30E+07	1,18891
1,20E+06	0,19861195	1,20E+07	0,628066	4,40E+07	1,202655
1,25E+06	0,20270747	1,25E+07	0,641017	4,50E+07	1,216245

Продолжение табл. 3

1,30E+06	0,20672187	1,30E+07	0,653712	4,60E+07	1,229684
1,35E+06	0,21065979	1,35E+07	0,666165	4,70E+07	1,242979
1,40E+06	0,21452542	1,40E+07	0,678389	4,80E+07	1,256132
1,45E+06	0,21832263	1,45E+07	0,690397	4,90E+07	1,26915
1,50E+06	0,22205491	1,50E+07	0,702199	5,00E+07	1,282035
1,55E+06	0,22572549	1,55E+07	0,713807	5,10E+07	1,294792
1,60E+06	0,22933733	1,60E+07	0,725228	5,20E+07	1,307424
1,65E+06	0,23289316	1,65E+07	0,736473	5,30E+07	1,319935
1,70E+06	0,2363955	1,70E+07	0,747548	5,40E+07	1,332329
1,75E+06	0,23984672	1,75E+07	0,758462	5,50E+07	1,344609
1,80E+06	0,24324897	1,80E+07	0,769221	5,60E+07	1,356778
1,85E+06	0,24660428	1,85E+07	0,779831	5,70E+07	1,368838
1,90E+06	0,24991456	1,90E+07	0,790299	5,80E+07	1,380794
1,95E+06	0,25318155	1,95E+07	0,80063	5,90E+07	1,392646
2,00E+06	0,25640693	2,00E+07	0,81083	6,00E+07	1,404399
2,05E+06	0,25959223	2,05E+07	0,820903	6,10E+07	1,416054
2,10E+06	0,26273891	2,10E+07	0,830853	6,20E+07	1,427613
2,15E+06	0,26584836	2,15E+07	0,840686	6,30E+07	1,43908
2,20E+06	0,26892185	2,20E+07	0,850406	6,40E+07	1,450457
2,25E+06	0,27196061	2,25E+07	0,860015	6,50E+07	1,461744
2,30E+06	0,27496579	2,30E+07	0,869518	6,60E+07	1,472946
2,35E+06	0,27793848	2,35E+07	0,878919	6,70E+07	1,484062
2,40E+06	0,28087971	2,40E+07	0,88822	6,80E+07	1,495096
2,45E+06	0,28379046	2,45E+07	0,897424	6,90E+07	1,50605
2,50E+06	0,28667166	2,50E+07	0,906535	7,00E+07	1,516924

Результаты экспериментов занести в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты определения удельной электрической проводимости

Образец	ΔE_{σ} , В	σ , См/м	Материал

Контрольные вопросы

1. Какие условия позволяют получить простые соотношения для выходного сигнала измерителя толщины изделия?
2. Какие факторы влияют на величину выходного сигнала измерителя толщины?
3. Что определяет рабочую частоту толщиномера?
4. С чем связано ограничение на максимальную величину напряженности магнитного поля?
5. Как рассчитать наибольшую исходную толщину изделия?
6. Как рассчитать предельно допустимое изменение толщины изделия?
7. Какое условие соотношения размеров магнитопровода и толщины изделия должно выполняться при измерении удельной электрической проводимости изделий?
8. Как должны быть размещены рабочий и компенсационный преобразователи при измерении удельной электрической проводимости изделий?
9. Чем ограничена величина напряженности магнитного поля при измерении электрических параметров изделия?

Список литературы

1. Герасимов Б.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / Б.Г. Герасимов, В.В. Ключев, В.Е. Шатерников. – М. : Энергоатомиздат, 1963. – 272 с.
2. Дякин В.В. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей / В.В. Дякин, В.А. Сандовский. – М. : Наука, 1981. – 136 с.
3. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / Герасимов В.Г., Останин Ю.Я., Покровский А.Д. и др. – М. : Энергия, 1978. – 215 с.
4. Сандовский В.А. К расчету сопротивления, вносимого трещиной в накладной преобразователь / В.А. Сандовский // Дефектоскопия. – 1976. – № 2. – С. 95–102.
5. Соболев В.С. Накладные и экранные датчики / В.С. Соболев, Ю.М. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.

6. Сандовский В.А. Приближенный расчет импеданса, вносимого немагнитной пластиной в накладной преобразователь / В.А. Сандовский, В.М. Барабашкин // Дефектоскопия. – 1977. – № 1. – С. 20–25.

7. Гончаров Б.В. Теория и практика безэталонных электромагнитных методов контроля / Б.В. Гончаров. – М. : Машиностроение, 1975. – 40 с.

8. Грушка К. Применение гармонического анализа для контроля ферромагнитных материалов / К. Грушка // Дефектоскопия. – 1983. – № 6. – С. 3–16.

9. Гордон А.В. Электромагниты постоянного тока / А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1960. – 446 с.

10. Пятин Ю.М. Постоянные магниты / под ред. Ю.М. Пятина. – М. : Энергия, 1980. – С. 267–306.

11. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники : в 3-х т. Т. 3. Теория электромагнитного поля / К. М. Поливанов ; ред. Б. Я. Жуховицкий. – М. : Энергия, 1975. – 208 с.

12. Авраменко А.А. Дифференциальный электромагнитный преобразователь с магнитопроводом / А.А. Авраменко, В.П. Себко // Дефектоскопия. – 1982. – № 3. – С. 38–43.

13. Универсальный накладной датчик для контроля магнитной проницаемости изделий из слабомагнитных материалов / Авраменко А.А., Друнов В.А., Себко В.П., Тюпа В.И. // Заводская лаборатория. – 1982. – № 11. – С. 51–52.

14. Электромагнитные измерительные преобразователи физических величин : учеб.-метод. пособ. / Авраменко А.А., Горкунов Б.М., Сиренко Н.Н., Львов С.Г. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2011. – 80 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки
до лабораторної роботи

«Вимірювання товщини і питомої електричної провідності немагнітних
провідних виробів накладними датчиками з магнітопроводом»
з дисципліни «Електромагнітні види неруйнівного контролю»
для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка» денної та заочної форм навчання

Російською мовою

Укладачі: АВРАМЕНКО Олександр Анатолійович
ГОРКУНОВ Борис Митрофанович
СІРЕНКО Микола Миколайович
ЛЬВОВ Сергій Геннадійович

Відповідальний за випуск проф. Г.М. Сучков

Роботу рекомендував до видання проф. В.І. Міліх

Редактор Н.В. Верстюк

План 2016 р., поз. 3

Підп. до друку 19.07.16. Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,0

Наклад 50 прим. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

Друкарня НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21